

CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO REALIZADOS EM LABORATÓRIO¹

*Leandro Almeida Dutra²
Antônio Cesar Bozzi³
José Daniel Biasoli de Mello⁴
Cherlio Scandian³*

Resumo

Nesse trabalho, verificou-se a correlação entre os resultados de taxas de desgaste obtidos entre três ensaios abrasivos distintos: um representado um mono-evento abrasivo – esclerometria pendular, o segundo representado um ensaio a dois corpos – pino-lixo e, finalmente, o terceiro a três corpos – ensaio LTM. Foram comparadas oito ligas, sendo três ligas de ferro fundido branco alto cromo e cinco ligas de alumínio-silício. A relação entre os ensaios, materiais e taxas de desgaste foi, então, observada. Verificou-se que o ensaio de esclerometria pendular é inversamente relacionado com os resultados do ensaio pino-lixo, apesar de serem aparatos que produzem, a priori, eventos severos. Verificou-se, também, uma correlação direta entre o ensaio LTM e o ensaio de esclerometria pendular.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo; Correlação; Taxa de desgaste.

CORRELATION AMONG ABRASIVE WEAR TESTS DONE IN LABORATORY

Abstract

In this study, it was observed the wear rate correlation of three severe abrasive wear tests. Eight alloys, three chromium white cast irons and five aluminum-silicon alloys were tested in three different severe abrasive wear tests. The first test, represents a single abrasive event - single-pass pendulum, the second, represents a two body abrasive wear test - pin-on-disk, and the third represents a three body abrasive wear test - LTM test. The correlation among this tests, materials and wear rates were then observed. It was verified that the single-pass pendulum test has a negative correlation with the pin-on-disk test although both represent, at first, severe events. It was also verified that the LTM test has a positive correlation with the single-pass pendulum.

Key words: Abrasive wear; Correlation; Wear rate.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, UFES.*

³ *Engenheiro Metalurgista, Professor Dr, UFES.*

⁴ *Engenheiro Mecânico, Professor Dr, UFU.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de componentes é a maior barreira encontrada atualmente para o aumento da disponibilidade da indústria. A deterioração de chapas de desgaste, brocas de perfuração, bombas, ciclones, bolas de moinhos, ventiladores e correias transportadoras são típicos eventos causadores de paradas indesejadas para manutenção. Além do custo de sobressalentes, o lucro cessante advindo das paradas contabiliza grandes perdas de faturamento.

O estudo do desgaste abrasivo aplicado à indústria, em especial nos setores de mineração e siderurgia, busca a especificação de materiais que permitam maiores tempos de operação. A seleção de materiais é feita a partir da correlação entre os resultados obtidos em laboratório com os dados coletados em aplicações práticas.^[1-4] Entretanto, poucos trabalhos têm sido publicados sobre a correlação entre os vários ensaios de desgaste abrasivos realizados em laboratório como, por exemplo, Misra e Finnie^[5] e Hawk *et al.*^[6]

O estudo apresentado centraliza as atenções em três ensaios: pino-lixia, largamente citado na literatura, a esclerometria pendular^[7-14] e ensaio LTM.^[15-17]

Os ensaios pino-lixia e esclerometria pendular têm sido usados para simular situações de desgaste abrasivo severo,^[3,18] sendo que a esclerometria pendular representa um mono-evento abrasivo. Já o ensaio LTM simula situações de desgaste abrasivo três corpos menos severos.^[16]

A correlação entre esses ensaios é apresentada ao longo do estudo. Para possibilitar maiores generalizações dos resultados, foram usados dois materiais polifásicos bem distintos metalurgicamente e em propriedades mecânicas (dureza).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Ligas de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC)

A Tabela 1 mostra a composição química, enquanto a Tabela 2 mostra os valores de dureza encontrados.

Tabela 1 - Composição química das ligas de FFBAC.

Amostra	%C	%Cr	%Si	%Ti	%V	%Mo	%P	%S	%Mn
A	1,7-1,8	25-27	0,5-0,7	0,12-0,18	0,15-0,25	0,3-0,5	0,04	0,03	0,7-0,9
B e C	1,4-1,6	25-28	1,25	-	-	-	0,02	0,015	0,8

Tabela 2 - Valores de dureza das ligas de FFBAC.

Amostra	Dureza [HV]	Desvio padrão
A	450,60	14,31
B	426,60	18,38
C	381,40	11,13

A liga B é apresentada como fundida. A liga C é apresentada após envelhecimento em serviço a 450 °C. A análise metalográfica é apresentada na Figura 1.

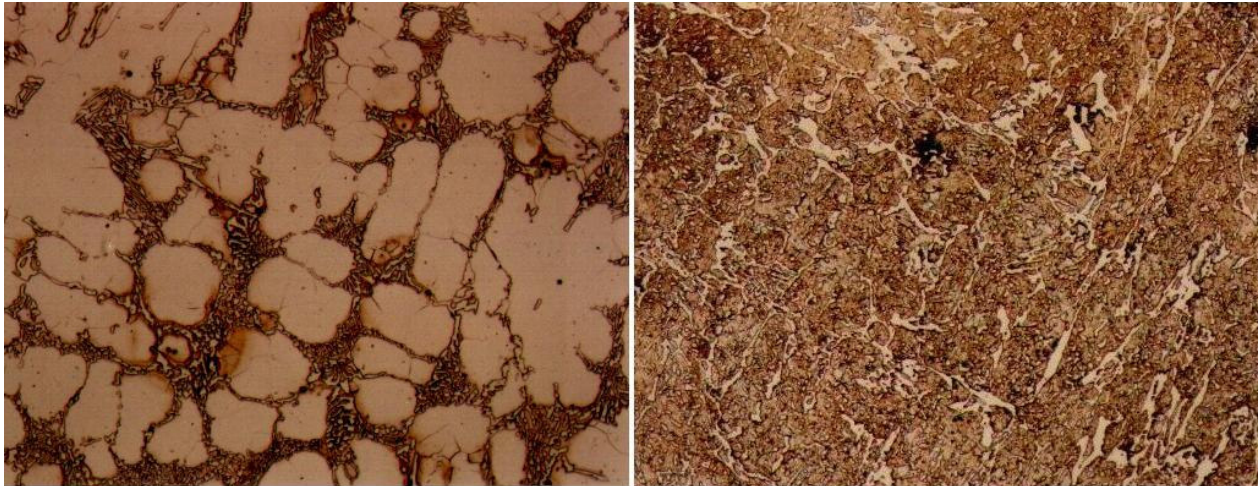


Figura 1 - Análise metalográfica das ligas B (à esquerda) e C (à direita). Reagente Vilella. Aumento 200x.

A liga B apresenta uma microestrutura composta de uma matriz austenítica e um eutético de austenita + M_7C_3 . Já a liga C, apresenta uma matriz ferrítica e predominância de carbonetos secundários $M_{23}C_6$ precipitados ao longo da matriz.

2.1.2 Ligas de alumínio-silício (Al-Si)

A Tabela 3 apresenta a porcentagem de silício nas ligas de Al-Si fundidas com seus respectivos valores de dureza. Os dados foram coletados da literatura.^[19]

Tabela 3 - Composição química e valores de dureza das ligas Al-Si.^[19]

Amostra	%Si	Dureza [HV]
D	0	21
E	5	43
F	9	51
G	12	56
H	16	63
I	21	63

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio LTM

O ensaio LTM foi desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Caracteriza-se por um ensaio de baixa tensão que pode e produzir mecanismos de deslizamento, rolamento ou mistos. A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático do abrasômetro.

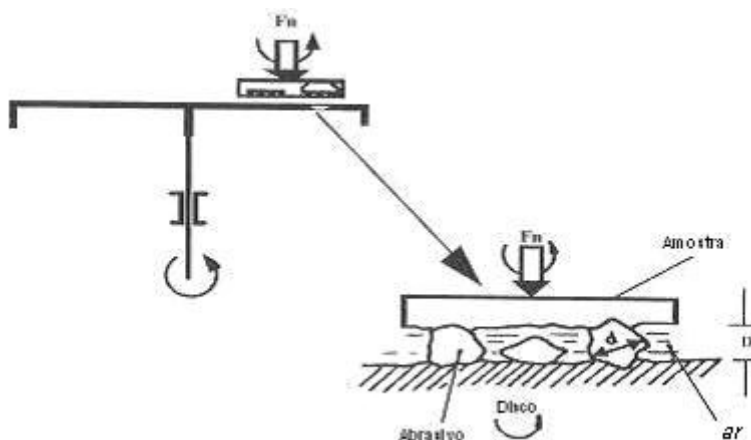


Figura 2 – Diagrama esquemático do Ensaio LTM. F_n é a força normal, d é o diâmetro médio do abrasivo e D é a distância entre o corpo e o contra-corpo.

A configuração do ensaio garante que, ao girar o contra corpo de ferro fundido, o porta-amostra girará no sentido contrário mantendo uma carga constante sobre as amostras. As partículas abrasivas lançadas sobre a superfície do contra corpo entram na interface contra corpo/amostra levando a remoção de matéria da amostra.

As principais variáveis de controle são: carga normal, fluido da interface, o tamanho, forma e tipo do abrasivo. A Tabela 4 mostra os parâmetros usados nos ensaios das ligas de FFBAC e Al-Si. Como resultado mede-se a taxa de desgaste das amostras.

Tabela 4 - Parâmetros do Ensaio LTM.

Parâmetros do ensaio	FFBAC	Al-Si ^[19]
Pressão normal (KPa)	30,37	408,28
Abrasivo	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Tamanho do abrasivo [μm]	150 a 300	7 ± 3,4
Fluido	ao Ar	Óleo

2.2.2 Pino sobre lixa

O aparato pino-lixia é amplamente conhecido. O diagrama esquemático é apresentado na Figura 3. O pino submetido a uma carga normal percorre um espiral de Arquimedes sobre um lixa completamente aderida ao disco e, então, o abrasivo fixo na lixa remove o material do pino. Usualmente o aparato caracteriza micromecanismos de desgaste abrasivo severos.

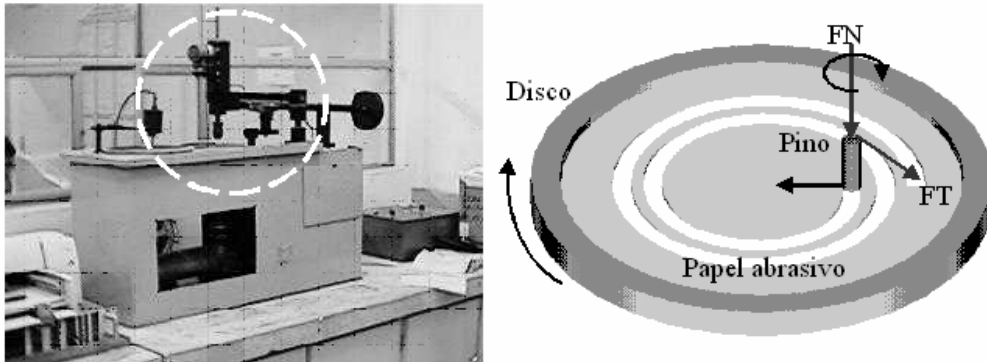


Figura 3 – Diagrama esquemático do aparato Pino-lixia. FN é a força normal e FT é a força tangencial.

Os parâmetros dos ensaios são apresentados na Tabela 5. Como resultado mede-se a taxa de desgaste das amostras.

Tabela 5 - Parâmetros do ensaio Pino sobre lixa.

Parâmetros do ensaio	FFBAC	Al-Si ^[19]
Vel. disco[rpm]	25	25
Vel. amostra [rpm]	25	20
Percurso [m]	3,2	3,2
Duração [s]	22	32
Abrasivo	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Tamanho do abrasivo [μm]		14,1 ± 8,5

2.2.3 Esclerometria pendular

A esclerometria pendular^[7-14] é uma técnica que simula a ação de um mono-evento abrasivo sobre a superfície de um material. Para simular esse evento, um elemento riscante, penetrador de geometria conhecida, é fixado na extremidade do pêndulo. Este, ao ser liberado, percute sobre a amostra gerando um risco em sua superfície. O diagrama esquemático do aparato é apresentado na Figura 4.

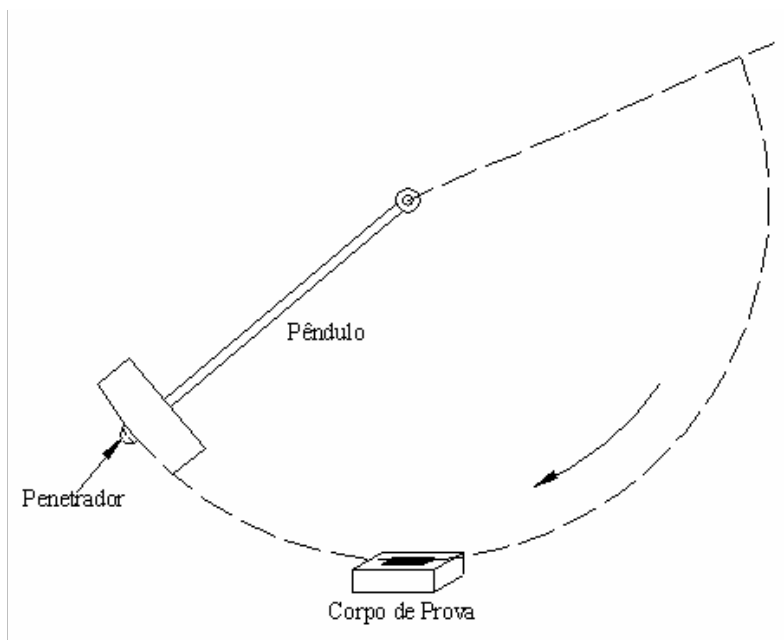


Figura 4 – Diagrama esquemático do esclerômetro pendular.

A energia de riscamento (E) é definida como a energia consumida durante a geração do risco na superfície da amostra. A massa (W) é medida pesando-se o cavaco originado após o risco.

Como resultado, calcula-se a energia específica (e) definida como a energia necessária para a remoção de uma unidade de massa da amostra.

A Tabela 6 mostra a os resultados do ensaio para as ligas de FFBAC e Al-Si. Os dados desse ensaio foram coletados da literatura.^[14,19,21]

Tabela 6 - Resultados do ensaio Esclerometria pendular^[14,19,21]

Resultados do ensaio	FFBAC			Al-Si					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
E(J)	2,21	2,29	2,48	0,98	1,36	1,41	1,35	1,18	1,07
W(mg)	2,40	2,50	2,20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

3 RESULTADOS

Uma vez que o pino-lixo e o ensaio LTM apresentam as taxas de desgaste definidas por massa removida dividido por um denominador, a taxa de desgaste da esclerometria pendular foi avaliada como o inverso da energia específica (e^{-1}).

As Figuras 5 e 6 apresentam a variação das taxas de desgaste com a dureza para as ligas de FFBAC e para as ligas de Al-Si, respectivamente.

Variação da taxa de desgaste com a dureza para FFBC

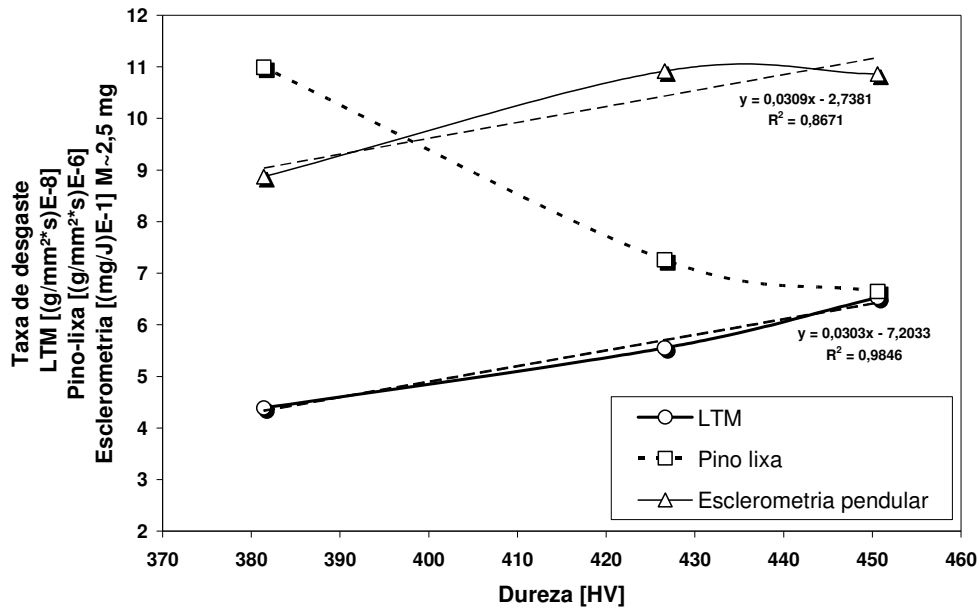


Figura 5 - Variação da taxa de desgaste com a dureza para as ligas de FFBC.

Variação da taxa de desgaste com a dureza para Al-Si

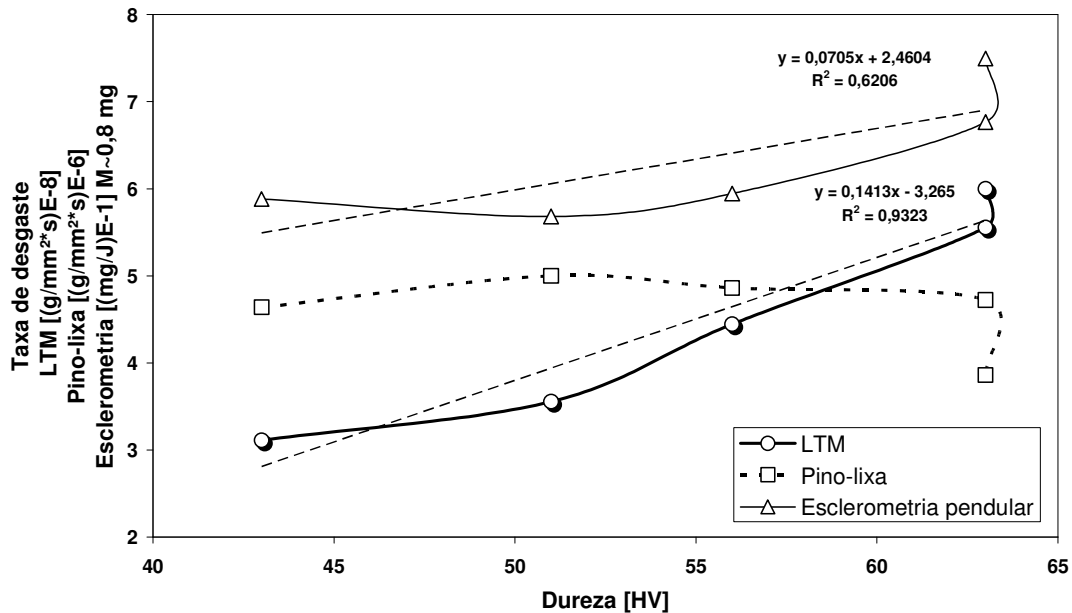


Figura 6 - Variação da taxa de desgaste com a dureza para as ligas de Al-Si.

A correlação encontrada entre os ensaios esclerometria pendular e pino-lixo, para ambos os materiais, é inversa.

Apesar da esclerometria pendular e do pino-lixo serem ensaios usados para simulação de situações de desgaste abrasivos severos os resultados das taxas de desgaste encontrados não são diretamente correlacionados. Entretanto, a esclerometria pendular correlaciona-se diretamente com o ensaio de desgaste abrasivo a três corpos menos severo, ensaio LTM. Nota-se que a inclinação das duas retas para ambos os materiais seguem a mesma tendência e para os FFBC são muito próximas.

Ressalta-se que, mesmo variando o material, fluido da interface, tipo e tamanho do abrasivo as correlações encontradas obedecem à mesma tendência.

4 DISCUSSÃO

Uma possível explicação para a correlação direta entre a esclerometria pendular e o ensaio LTM e inversa entre a esclerometria pendular e o pino-lixo encontra-se no estudo apresentado por Zum Gahr.^[22] Este correlacionou a configuração construtiva dos aparatos com a resposta do tribosistema.

A Figura 7 mostra dois sistemas hipotéticos. No sistema I, a distância (h) entre o contra corpo e a amostra é mantida constante independente das propriedades dos materiais. Logo a profundidade de indentação da partícula abrasiva é mantida constante e, para isso, o sistema fornece a carga normal necessária à deformação que ocorrerá. No sistema II, a carga normal sobre a partícula abrasiva é limitada e constante, então, as propriedades mecânicas dos materiais, tais como, capacidade de deformação (φ_{lim}), tensão de escoamento (σ_y) e encruamento interferem na deformação efetiva (φ_{eff}). A deformação efetiva pode ser definida como deformação que a partícula abrasiva efetivamente provoca na superfície da amostra.

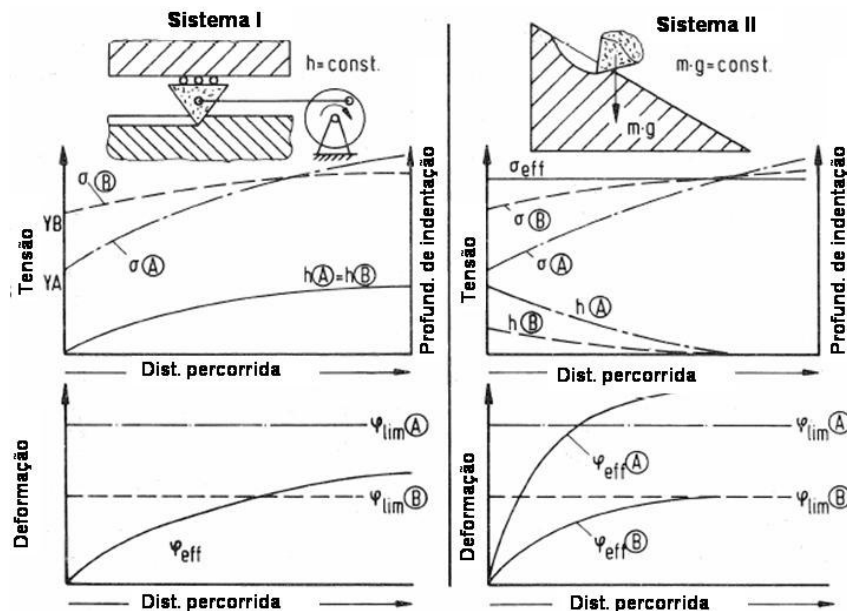


Figura 7 – Efeito da capacidade de deformação e do limite de escoamento na taxa de desgaste

Logo, a propriedade mais importante para o aumento da resistência ao desgaste no sistema I é a capacidade de deformação e no sistema II é o limite de escoamento.

A configuração do ensaio pino-lixo assemelha-se ao sistema I, já a configuração dos ensaios LTM e da esclerometria pendular ao sistema II.

5 CONCLUSÃO

1. Independente da natureza do material, o ensaio LTM e o ensaio esclerometria pendular são correlacionados diretamente, enquanto que o ensaio pino-lixo e o ensaio esclerometria pendular têm uma correlação inversa.
2. O estudo apresentado por Zum Gahr quanto à configuração construtiva do aparato, altura constante ou carga constante, oferece uma explicação para os resultados encontrados neste trabalho.

Agradecimentos

Agradecemos aos laboratoristas Ângela Maria (LTM-UFU) e Carlos Alberto Zampieri (TRICORRMAT-UFES) que cooperaram para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIA

- 1 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Prediction of gouging abrasion resistance of steel by pendulum grooving and other laboratory test methods. *Wear*, 115, p. 203-213, 1987.
- 2 BLAU, P. J; Design and validation of laboratory-scale simulation for selecting tribomaterials and surface treatments, *World Tribology Congress (1997)*
- 3 ALBERTIN, E; SINATORA, A. Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill. *Wear*, 250, p.492-501, 2001
- 4 STACHOWIAK, G. W; BATCHELOR, A. W; STACHOWIAK, G. B. *Experimental Methods in Tribology; Tribology Series, 44; Elsevier, 1º Edição, 2004.*
- 5 MISRA, A.; FINNIE, I. Correlation between two-body and three-body abrasion and erosion of metals. *Wear*, 68, p.33-39, 1981.
- 6 HAWK, J. A; WILSON, R. D.; TYLCZAK, J. H; DOGAN, O. N. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, 225-229, p. 1031-1042, 1999.
- 7 VINGSBO, O; HOGMARK, S. Single-pass grooving – A technique for abrasive testing. *Wear*, 100, p. 489-502, 1984.
- 8 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Mechanisms of gouging abrasive wear of steel investigated with the aid of pendulum single-pass grooving. *Wear*, 112, p. 145-162, 1986.
- 9 BRYGGMAN, U; HOGMARK, S; VINGSBO, O. Prediction of gouging abrasion resistance of steel by pendulum grooving and other laboratory test methods. *Wear*, 115, p. 203-213, 1987.
- 10 FRANCO, S. D; MELLO, J. D. B. An investigation of the abrasive wear of Al-Si alloys with the aid of Upsala's pendulum. *Material Science and Engineering*, A154, p. 175-181, 1992.
- 11 JIANG, J; YAO, M; SHENG, F; GAO, X. Dynamical analysis of the wear behavior of steels during the pendulum single particle gouging wear tests. *Wear*, 181-183, p.371-378, 1995.

- 12 LIANG, Y. N; LI, S. Z; LI, D. F; LI, S. Some developments for single-pass pendulum scratching. *Wear*, 199, p.66-73, 1996.
- 13 VELEZ, J. M; TANAKA, D. K; SINATORA, A; TSCHIPTSCHIN, A. P. Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. *Wear*, 251, p.1315-1319, 2001.
- 14 DEL PIERO, R. C; MELLO, J. D. B; SCANDIAN, C. Resistência ao desgaste abrasivo à quente de ferros fundidos brancos alto cromo utilizado em barras de grelha na sinterização. 59^o Congresso Anual da ABM, 2004.
- 15 COSTA, H. L; PANDOLFELLI, V. C; MELLO, J. D. B. On the abrasive wear of zirconias. *Wear*, 203-204, p. 626-636, 1997.
- 16 AL-RUBAIE, K. S; GOLDENSTEIN, H; MELLO, J. D. B. Three-body abrasion of Al-SiC composites. *Wear*, 225-229, p. 163-173, 1999.
- 17 BOZZI, A. C; MELLO, J. D. B. Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. *Wear*, 233-235, p. 575-587, 1999.
- 18 ZUM GAHR, Z. H; *Tribology International*, vol. 31, n^o 10, p. 587-596, 1998
- 19 S. Franco, Contribuição ao estudo do desgaste abrasivo de materiais polifásicos, Universidade Federal de Uberlândia, (1989), Dissertação de mestrado.
- 20 O. Vingsbo and S. Hogmark, *Wear*, 100 (1984) 489
- 21 R. Del Piero, Resistência ao desgaste abrasivo a quente de ferros fundidos branco alto cromo, utilizados em barras de grelha na sinterização, Universidade Federal do Espírito Santo, (2004), Dissertação de mestrado.
- 22 ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and wear materials*. Tribology series 10, Elsevier Science Publishers B. V., 1987.